干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.04

公路风吹雪防治工程设计量级计算初探①

马 磊, 刘 健, 胡智轩, 李在蓝, 何 勇, 吴 鹏
(干旱荒漠区公路工程技术交通运输行业重点实验室,新疆交通科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 利用极值Ⅰ型分布和WeiBull分布研究了新疆阿勒泰闹海风区冬季风的极值分布、平均风速概率分布、引发风吹雪的风时数。利用极值、平均概率分布面域、风吹雪时数来量化风吹雪的强度,并将计算得出的风吹雪防治工程设计量级,纳入风吹雪影响区域内的公路设计中。结果表明:通过WeiBull分布的平均风速和风吹雪有效时间分布来计算防雪工程量级是一种公路风吹雪防治工程的计算方法,防雪工程的设计并没有明确的以再现期为指标的设计量级,仅存在防治灾害的量级。

关 键 词: 公路; 风吹雪; 防雪工程; 设计频率; 吉木乃;

国内外各种风吹雪防治工程研究较为成熟,美国学者罗纳德编制了风吹雪防雪工程和公路设计手册[1],日本学者竹内政夫[2-3]对防雪工程前后雪丘堆积形态进行了研究。国内学者陈晓光等[4]对新疆地区风吹雪对策进行了探讨,应成亮等[5]对防雪栅栏开展了模拟实验。目前,国内外防吹雪工程研究或者风吹雪特性的理论研究偏多,而将风吹雪量化并指导工程设计的研究较少,李京陵等[6]采用的雪源计算方法较为粗糙,设计量级偏大。

新疆是公路风吹雪危害严重影响区域之一[7]。其中,玛依塔斯老风口风区(额敏、托里县),闹海风区(吉木乃县)又是新疆地区最为著名的风吹雪影响区域。每年11月~次年3月期间闹海风区[8]风雪弥漫,能见度几乎为零,S319线公路路面积雪最严重的段落厚度超过2 m。玛依塔斯区域的G3015线克塔高速、S201线由于风吹雪原因最大不通车天数超过80 d[9]。风吹雪灾害严重影响了新疆乃至北方广大地区的冬季交通运输安全,造成了严重的经济损失。本文结合降雪、吹雪及风的概率分布对风吹雪的设计指标进行量化研究,进而指导新疆地区吹雪防治工程设计工作。



图1 吉木乃闹海风区风吹雪灾害现状

Fig. 1 Situation of wind blowing snow disaster in Jimunai

1 风强度 N 年再现期极值计算

风强度研究在我国《建筑结构荷载规范》[10]《电力工程气象勘测技术规程》[11]中均有较为全面的论述。就再现期而言,高梓淇等[12]分析了50 a一遇各种分布的可靠性,认为在长序列计算中推荐使用WeiBull分布,纪鹏远等[13]对3种分布进行了比选,认为建筑规范中推荐使用的极值Ⅰ型分布是有效合理的。本次采用极值Ⅰ型分布计算N年一遇极值,即再现期。

本文以吉木乃恰勒什海乡气象站2009—2016年冬季11月1日~次年3月31日间的统计数据为

① **收稿日期:** 2019-02-15; **修订日期:** 2019-05-24
基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2014319797050)
作者简介: 马磊(1991-),男,研究实习员,本科,研究方向为公路风吹雪防治. E-mail:569594849@qq.com
通讯作者: 刘健. E-mail:22369826@qq.com

基础,分析风和移雪量的分布、再现期的设计频率,计算有效风时数,确定防雪工程设计量级。

先对气象站的数据进行处理,建筑规范要求 10 min 平均风速,其他时间间隔的风速可按照规范中的转换方法转换。气象站提供的数据一般为 10 m 高度的风况,而移雪量的计算与一般计算方法不同,移雪量的风速一般采用 1 m 高度[3]的风速,因此需要将原始数据转化为 1 m 高的风速数据,计算方法见公式(1),计算结果见表 1。

$$V_d = k_2 k_5 V_{10} \tag{1}$$

式中:V_d 表示高度 d 处的风速(本文中 $d=1$ m);V_{10} 表示 10 m 高度的标准风速;k_2 表示地面粗糙度(按照 1 取值),k_5 表示阵风风速系数(按照 1.38 取值)[14]。

表 1　恰勒什海乡风速 / $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

Tab. 1　Wind speed in the Qialeshihai area　/ $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

年份	10 m 均值	1 m 极值	年份	10 m 均值	1 m 极值
2009	23.20	32.02	2013	17.70	24.43
2010	23.30	32.15	2014	19.30	26.63
2011	19.00	26.22	2015	19.60	27.05
2012	20.20	27.88	2016	18.60	25.67

采用极值 I 型分布计算 1 m 高风速极值频率分布,并采用规范法计算极值:

$$f(x) = \mathrm{esp}\left\{ -\exp\left[-\alpha(x-\mu) \right] \right\} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{C_1}{s_1} \tag{3}$$

$$\mu = \bar{X} - \frac{C_2}{\alpha} \tag{4}$$

$$X_R = \mu - \frac{1}{\alpha}\ln\left[\ln\left(\frac{R}{R-1} \right) \right] \tag{5}$$

式中:$f(x)$ 表示极值 I 型概率分布;α 表示分布的尺度参数;x 表示 1 m 高度最大风速样本;μ 表示分布的位置参数;s_1 表示样本标准差;$\bar{X}$ 表示样本平均数;C_1 和 C_2 为系数;X_R 表示表示再现期为 R 的最大风速[11]。

将 1 m 高度风速极值代入计算后的得出再现期为 10 a、20 a、30 a、50 a、100 a 的设计频率,见表 2。

表 2　1 m 高度风速再现期极值 / $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

Tab. 2　Recurring period of extreme wind speed at 1 m　/ $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$

设计频率	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
风速极值	32.70	33.90	34.59	35.48	37.42

2　移雪量 *N* 年再现期极值计算

风吹雪移雪量的研究 20 世纪就有了可靠度较高的研究成果,美国、加拿大、日本学者都相继进行了研究,刘宝河等[15]、王中隆等[16]的研究都表明贴地 1 m 以下的风吹雪占总体风雪流的 90% 以上,造成路面风积雪的雪源也来自这部分吹雪,因此研究 1 m 以下的移雪量可以估算公路设计所需的移雪量设计量级。

$$Q = 0.002\,9U^{4.16} \times 10^{-3} \tag{6}$$

式中:Q 表示移雪量($\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$);$U$ 表示 1 m 高度上的风速。

依据陈练等[17]对新疆、西藏的等地区的研究结论,我国日平均风速的概率分布是明显的偏态分布,能较好地用 Weibull 分布描述。本文也采用这一分布计算移雪量再现期极值。

$$f(x) = \frac{b}{a}\left(\frac{b}{a}\right)^{b-1}\exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^{b} \right] \tag{7}$$

式中:a 表示分布的尺度参数;b 表示分布的形状参数[18]。

$$b \cong \left[\frac{\mathrm{mean}(x)}{\mathrm{std}(x)} \right]^{1.086} \tag{8}$$

$$a = \frac{\mathrm{mean}(x)}{\Gamma\left(1+\frac{1}{b}\right)} \tag{9}$$

式中:x 与移雪量计算公式中的 U 为同一变量,风吹雪的启动风速受雪的粘滞力及雪的物理性质影响,一般而言雪的启动风速大于 4 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$[9],由于风吹雪的形成是每种风速的概率叠加的效果,因此本次采用分段积分的方式将(7)代入公式(6)得出:

$$Q = \sum_{4}^{N}\left[0.002\,9X^{4.16}/1\,000 \int_{x}^{X+1} f(v)\,\mathrm{d}(v) \right] \tag{10}$$

代入上述气象站点的相关数据求得单位时间移雪量为 0.024 3 $\mathrm{kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}}$。

3 风吹雪危害有效时数计算

根据风速平均概率分布面域，可以求出风吹雪影响有效时间，即有效风吹雪时数，即 v_q（起动风速 4 m·s^{-1}）至 v_N（N 年再现期极值风速）统计时间段 T_0 内的小时数。

$$T = T_0 \int_{v_q}^{v_N} f(v)\mathrm{d}(v) \tag{11}$$

$$= T_0 \left\{ \exp\left[-\left(\frac{v_q}{a}\right)^b \right] - \exp\left[-\left(\frac{v_N}{a}\right)^b \right] \right\} \tag{12}$$

以上述案例为例，吉木乃地区地区冬季最大稳定积雪日数为 170 d[19-20]，代入计算后得出有效风吹雪日数为 88.74 d。值得注意的是当设计频率在 10～100 a 间变动时，有效时间占比都在 52.2% 左右，差别在万分之一左右，这种差别对于实际计算的影响很小，因此防雪工程与一般的公路工程的设计频率不同，结构设计存在某设计频率计算参数，防雪量级不存在某种年限的极值，只存在是和非两种情况。

4 风吹雪危害设计量级计算

通过移雪量与移雪时间的对比，计算风吹雪的重量，通过吹雪密度换算吹雪体积，从而计算出某防雪工程设计量级。

$$V_Q = \frac{QT}{\rho} \tag{13}$$

式中：V_Q 表示断面输雪体积（m^3）；Q 表示季节单位时间断面移雪量（m^3·m^{-1}·s^{-1}）；T 表示移雪时间（s）；ρ 表示风吹雪密度（kg·m^{-3}）。

通过对比与计算吉木乃地区的风吹雪密度 ρ 实测值为 412 kg·m^{-3}，将上述数据代入以上公式得出，吉木乃地区断面输雪体积或风吹雪强度为 452 m^3·m^{-1}。

美国学者莱纳德依据风吹雪物质守恒的原理，认为除去融雪、地形或植被截留部分风吹雪、忽略风吹雪蒸发，其余的积雪被风重新分布，移雪量与风吹雪移雪距离，移雪水当量有关[1]。季节断面移雪量可以表述为：

$$Q_t = 500TS_{\mathrm{rwe}}(1 - 0.14^{F/T}) \tag{14}$$

式中：Q_t 表示季节断面移雪重量（kg）；T 表示最大移雪距离（m），一般取 3 000 m；S_{rwe} 表示移雪水当量（m）；F 表示吹雪可移动距离（m），取 3 000 m。

依据刘栎杉等[21]的研究成果，吉木乃区域冬季降雪量取 1 100 mm，S_{rwe} 约为 0.22 m，依据上述文献，最大移雪距离平均为 3 000 m。F 取 3 000 m 是合理的，计算得出断面输雪体积为 606 m^3，与本文的计算结果处在一个量级，本文计算结果略小 34%，受地域取值等因素影响，认为本文的计算方法合理。

防雪工程的设计量级使用下列公式：

$$N = \frac{V_Q \rho_Q}{V_d \rho_d} \tag{15}$$

式中：N 表示防雪工程设计数量；V_Q 表示防雪工程断面阻雪体积；V_d 表示防雪工程断面阻雪体积；ρ_Q 表示风吹雪密度（kg·m^{-3}）；ρ_d 表示防雪工程积雪密度（kg·m^{-3}）。

防雪工程实践中，防雪工程的阻雪能力并没有使用再现期为指标，而是根据防雪工程本身的阻雪能力来确定，例如日本北海道 4 m 高的防雪栅栏实测断面阻雪量为 47 m^3，新疆塔城地区 4 m 高的防雪栅栏（图 2）实测最大断面阻雪量为 73 m^3[9]（图 3）。防雪工程的实际防雪能力与其与风向的夹角，地形等相关，设计中应根据以上条件对阻雪能力进行校正。

5 结 论

（1）为了明确风吹雪防治工程的设计量级，本文采用吉木乃地区 8 a 气象站连续观测数据，运用极值 I 型分布计算 1 m 高度的不同再现期的风速极值、并运用威布尔分布计算了同一时期的再现期移雪量、风吹雪有效时数。通过上述计算分析表明：风吹雪危害的严重程度与风速极值没有明显直接关系，而与风吹雪发生过程中的断面移雪量、有效时数、有效吹雪风速频率 3 因素密切相关。通过研究 3 因素的相关性，本文提出了风吹雪危害设计量级计算方法，并通过美国学者的降雪量计算方法验证有效。

（2）在研究过程中，本文对移雪量计算方法进行了改进，采用基于风速的分段积分累加方式提出了考量风速再现期的移雪量计算方法；运用数值计

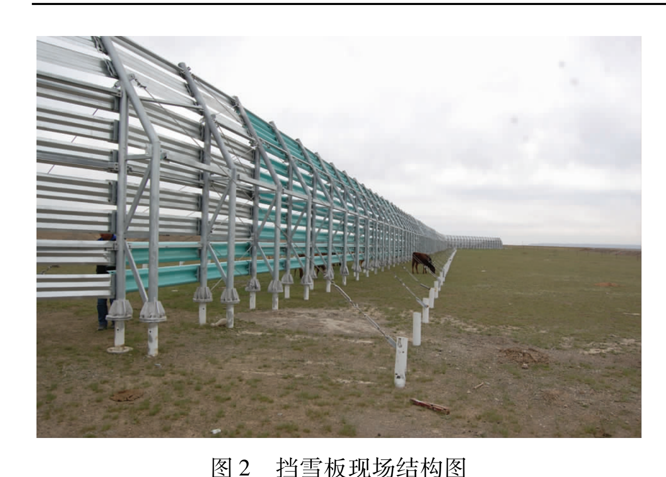


图 2　挡雪板现场结构图

Fig. 2　Structure of snow fence

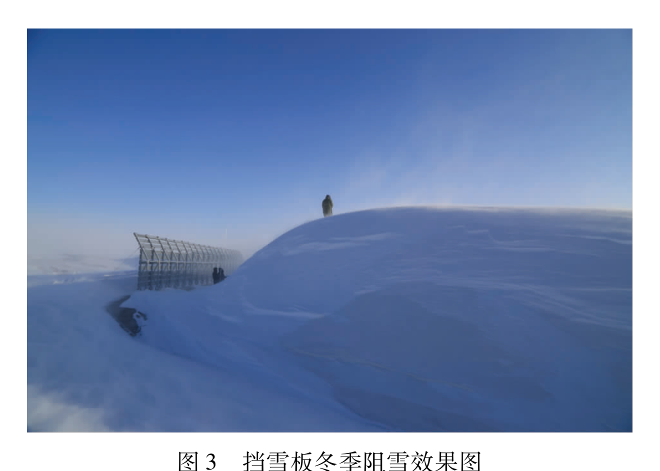


图 3　挡雪板冬季阻雪效果图

Fig. 3　Shape of snow behind snow fence

算和现场工程实践经验,提出了与美国基于降雪量不同的基于风速分布的风吹雪危害计算方法,可以指导新疆玛依塔斯风区等风吹雪危害区域公路、铁路防雪工程设计工作,并为建设单位提供决策依据。

(3) 风吹雪运动影响因子较多,本文研究的是新疆积雪条件下宏观的风吹雪防治工程设计量级计算方法,区域风吹雪运动微观机理还有待进一步研究。

参考文献(References)

[1] TABLER R. Controlling blowing and drifting snow with snow fences and road design[R]. Niwot: Tabler and Associates,2003.

[2] 竹内政夫,石本敬志,野原他喜男,等. 防雪柵の研究 = 柵前後の吹溜り雪丘形状[J]. 雪と道路,1984,(1):96 – 100.[MASAO Takeuchi,TAKASHI ishimoto,NOBORU Hara,et al. Study of snow pattern at the front and back of snowfence[J]. Snow and Road,1984,(1):96 – 100.]

[3] 竹内政夫. 吹雪とその対策[J]. 雪氷,2000,62(1):41 – 47.[MASAO Takeuchi. Snowstorm and countermeasures[J]. Snow and Ice,2000,62(1):41 – 47.]

[4] 陈晓光,李俊超,李长林,等. 风吹雪对公路交通的危害及其对策研讨[J]. 公路,2001,(6):113 – 118.[CHEN Xiaoguang,LI Junchao,LI Changlin,et al. The harmness of wind blowing snow on road traffic and its countermeasures[J]. Highway,2001,(6):113 – 118.]

[5] 应成亮,李江,张霞,等. 防雪栅设计高度的数值仿真研究[J]. 长春理工大学学报,2006,29(3):54 – 57.[YING Chengliang,LI jiang,ZHANG Xia,et al. Design numerical simulation on the height of the journal of snow fence[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2006,29(3):54 – 57.]

[6] 李京陵,仲坚,姚辉,等. 新疆托里县老风口风雪灾害及其生物治理[J]. 干旱区地理,1993,16(4):1 – 10.[LI Jingling,ZHONG Jian,YAO Hui,et al. Wind and snow disasters and their biological treatment in the old tuyere of Xinjiang[J]. Arid Land Geography,1993,16(4):1 – 10.]

[7] 王显祎. 公路风吹雪的成因机理分析[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2003.[WANG Xianyi. Analysis of genetic mechanism of wind blowing snow in highway[D]. Harbin:Northeast Forestry University,2003.]

[8] 李春芳,潘冬梅,达吾提汗. 阿勒泰地区"闹海风"天气的分析[J]. 新疆气象,2005,28(z1):33 – 34.[LI Chunfang,PAN Dongmei,Dawutihan. The analysis of the regional east gale in Aletai[J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology,2005,28(z1):33 – 34.]

[9] 刘健,陈晓光,傅航,等. 新疆国省干线冰雪灾害防治应急保障关键技术研究及应用[R]. 乌鲁木齐:新疆交通科学研究院,2016.[LIU Jian,CHEN Xiaoguang,FU Hang,et al. Research and application of key technology for emergency assurance of ice and snow disaster control in Xinjiang Province[R]. Urumqi:Xinjiang Academy of Transportation Sciences,2016.]

[10] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].[GB 50009—2012,Load coad for the design of building structures[S].]

[11] DL/T 5158—2012,电力工程气象勘测技术规程[S].[DL/T 5158—2012,Technical code for meteorological survey in electric power engineering[S].]

[12] 高梓淇,张秀芝,孙即霖. 五十年一遇最大风速计算方法比较[J]. 风能,2014(4):70 – 75.[GAO Ziqi,ZHANG Xiuzhi,SUN Jilin. Comparison of the methods of maximum wind speed calculation in fifty years[J]. Wind Energy,2014(4):70 – 75.]

[13] 纪鹏远,邸小坛,徐骋. 关于风速概率分布的分析研究[J]. 建筑科学,2016,32(7):14 – 18.[JI pengyuan,DI Xiaotan,XU Chi. Research on the probability distributions of wind speeds[J]. Buliding Science,2016,32(7):14 – 18.]

[14] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].[JTG D60—2004,General code for design of highway bridges and culverts[S].]

[15] 刘宝河,左合君,王嫣娇,等. 锡林郭勒典型草原区平坦草地风雪流结构特征[J]. 干旱区研究,2017,34(5):1042 – 1048.[LIU Baohe,ZUO Hejun,WANG Yanjiao,et al. Snow drift struc-

ture over a flat typical steppe in Xilingol Inner Mongolia, China [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1042 – 1048.]
[16] 王中隆. 中国风雪流及其防治研究[M]. 兰州：兰州大学出版社, 2001: 44 – 47. [WANG Zhonglong. Snowdrift and treat study in China [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001: 44 – 47.]
[17] 陈练, 李栋梁, 吴洪宝. 中国风速概率分布及在风能评估中的应用[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1209 – 1214. [CHEN Lian, LI Dongliang, WU Hongbao. The probability distrubution of wind speed and its application in estmation of wind energy in China[J]. Acta Energyciae Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1209 – 1214.]
[18] MONAHAN A D. The probablity distribution of sea surface wind speeds. Part 1: Theory and sea winds observations[J]. Journal of Climate, 2006, 19(4): 497 – 519.
[19] 潘冬梅, 庄小翠, 潘雪梅. 吉木乃县灾害性天气"闹海风"特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 39 – 42. [PAN Dongmei, ZHUANG Xiaocui, PAN Xuemei. Characteristic analysis of rigion east gale in Jimunai [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(5): 39 – 42.]
[20] 徐少柏. 吉木乃地区"闹海风"初步分析及预报[J]. 新疆气象, 1988(9): 23 – 25. [XU Shaobai. Preliminary analysis and forecast of "sea breeze" in Jimunai area[J]. Xinjiang Meteorology, 1988(9): 23 – 25.]
[21] 刘栎杉, 延军平. 阿勒泰地区冬季降水变化特征及雪灾趋势判断[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 72 – 78. [LIU Dongshan, YAN Junping. The winter precipitation characteristics and snowstorm trend in Altay region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 72 – 78.]

Calculation of magnitude of snowdrift on highway in its prevention engineering design

MA Lei, LIU Jian, HU Zhi-xuan, LI Zai-lan, HE Yong, WU Peng

(*Key Laboratory of Highway Engineering Technology and Transportation Industry in Arid Desert Area, Xinjiang Academy of Transportation Sciences, Urumqi* 830000, *Xinjiang, China*)

Abstract: The extremum distribution of winter wind, the mean wind speed probability distribution and the wind hours of snowdrift at Naohai wind zone of Jimunai County, Xinjiang, China are studied using extreme Ⅰ type distribution and WeiBull distribution. The magnitude of wind-blown snow is quantified using the extreme value, the average probability distribution area and the wind-blown snow hour. The computed wind-blown snow magnitude is included for the road engineering design in the areas affected by wind and snow. The conclusion shows that the calculation of the snow protection engineering grade based on the mean wind speed of WeiBull distribution and the effective time distribution of wind-blown snow is a feasible method for the snowdrift prevention and control engineering on the highway. The design of the snow prevention projects does not have a clear design level with the reoccurrence period as an indicator, but only exists the magnitude of the disaster prevention and control. The extreme Ⅰ type distribution can be used as load calculation of snow fence, but it could not fit in the magnitude calculation of wind-blown snow. Using WeiBull distribution to calculate the effective blowing time and the average distribution of wind can effectively express the intensity of the wind-blown snow. Through this pattern, we can cipher out that the effective wind and snow blowing time is 88.74 days and the wind and snow magnitude is 452 $m^3 \cdot m^{-1}$ at the zone.

Key words: highway; wind-blown snow; snow fence design; design frequency; Jimunai County